

Mirosław NOWAKOWSKI, Jarosław CISZKOWSKI, Sebastian RUTKOWSKI, Karol MIŁOSEK,
Wojciech LORENC

PROJEKT ZAUTOMATYZOWANEJ WIELOZADANIOWEJ HAMOWNI SILNIKÓW BLDC

W artykule omówiony został projekt koncepcyjny hamowni silników bezszczotkowych wchodzących w skład zespołu napędowego bezzałogowych statków powietrznych.

Celem projektu jest wykonanie stanowiska do pomiaru parametrów zespołu napędowego. Analizie będą podlegały takie parametry jak: moment obrotowy silnika, siła ciągu, temperatura silnika, prędkość obrotowa silnika, prąd pobierany przez układ napędowy, sprawność silnika, wibracje.

Analiza w/w parametrów pozwoli na opracowanie metod detekcji i kompensacji defektów silnika, określenie rezerwu układu napędowego, opracowanie bazy danych zespołów napędowych, co umożliwi szybkie i efektywne projektowanie BSP.

WSTĘP

Dynamiczny rozwój elektrycznych silników bezszczotkowych prądu stałego (BLDC) sprawia, że znajdują one zastosowanie w nowych gałęziach przemysłu, w tym także w lotnictwie bezzałogowym. Wspomniane silniki posiadają szereg zalet, dzięki którym mogą być one stosowane w zespołach napędowych bezzałogowych statków powietrznych, jak również do stabilizacji i sterowania głowic obserwacyjnych. Ich główną zaletą w porównaniu ze stosowanymi dawniej silnikami elektrycznymi wyposażonymi w komutatory mechaniczne oraz szczotki jest duży stosunek uzyskanej mocy w relacji do masy własnej. Ponadto silniki bezszczotkowe BLDC cechują się dłuższą żywotnością w porównaniu do poprzedników. Podwyższona żywotność wynika głównie z braku grafitowych szczotek, które dociskane do komutatora wycierały się w czasie eksploatacji. Silnik BLDC pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Budowa silnika BLDC

Elementami z jakich składa się silnik BLDC są najczęściej:

- wirująca obudowa z magnesami,
- statyczny korpus z nawiniętymi uzwojeniami,
- elementy mocujące obudowę z korpusem: oś, podkładka i pierścień Seegera.

Z uwagi na brak mechanicznego komutatora w celu uruchomienia silnika BLDC konieczne jest zastosowanie komutatora elektronicznego.

Podstawowymi parametrami silników BLDC są:

- napięcie zasilania,

- prędkość obrotowa,
- moment obrotowy,
- wymiary zewnętrzne.

Różnorodność potrzeb użytkowników BSP wymusza na producentach bezzałogowców konieczność przeprowadzania testów zespołów napędowych, celem oceny parametrów i charakterystyk pracy silnika w całym jego zakresie użytkowym. Wiedza ta pozwoli na optymalne projektowanie BSP ze względu na zasięg i długotrwałość lotu, większą prędkość przelotową czy masę przenoszonego ładunku.

1. BUDOWA I ZASADA DZIAŁANIA HAMOWNI

Projekt hamowni przewiduje jej modułową konstrukcję, pozwalającą na modyfikowanie budowy w szybki i łatwy dla użytkownika sposób, w zależności od potrzeb. Hamownia umożliwi testowanie zespołów napędowych w następujących konfiguracjach:

- pojedynczy silnik ze śmigłem ciągnącym/pchającym (rys. 2),
- dwa silniki w układzie przeciwbieżnym (dwa śmigła ustawione współosiowo, obracające się w przeciwnych kierunkach), (rys. 3).



Rys. 2. Pojedynczy silnik ze śmigłem ciągnącym



Rys. 3. Układ przeciwbieżny śmigieł

Zasada działania hamowni sprowadzałaby się do pomiaru w czasie rzeczywistym następujących parametrów:

- napięcia U [V],
- natężenia prądu pobieranego przez układ napędowy I [A],
- prędkości obrotowej silnika n_{motor} [obr/min],
- momentu obrotowego silnika M_{o_motor} [Nm],
- temperatury silnika T [°C],
- siły ciągu F [N],
- wibracji silnika z i bez śmigła.

Na podstawie powyższych danych, program komputerowy wyznaczać będzie następujące wielkości pochodne:

- prędkość kątową silnika ω_{motor} [rad/s]:

$$\omega_{motor} = \frac{2\pi n_{motor}}{60} \quad (1)$$

- moc mechaniczną silnika P_{m_motor} [W]:

$$P_{m_motor} = M_{o_motor} \cdot \omega_{motor} \quad (2)$$

- moc elektryczną silnika P_{e_motor} [W]:

$$P_{e_motor} = U \cdot I \quad (3)$$

- sprawność silnika η_{motor} [%]:

$$\eta_{motor} = \frac{P_{m_motor}}{P_{e_motor}} \quad (4)$$

- sprawność śmigła $\eta_{propeller}$ [%]:

$$\eta_{propeller} = \frac{F}{P_{m_motor}} \quad (5)$$

Należy zwrócić uwagę na fakt, że moc mechaniczna silnika jest równa mocy mechanicznej śmigła. Wynika to stąd, że cała moc mechaniczna silnika jest bezpośrednio przekazywana na śmigło poprzez wał napędowy (nie występuje redukcja mocy).

Całkowita sprawność zespołu napędowego zależy od prawidłowego doboru silnika ze śmigłem i jest definiowana wzorem:

$$\eta_{ZN} = \eta_{propeller} \cdot \eta_{motor} \quad (6)$$

Pomiar parametrów niezbędnych do wyznaczenia poszczególnych sprawności zostanie wykonany na zasadzie jednoczesnej rejestracji napięcia, natężenia prądu, prędkości obrotowej, momentu obrotowego oraz siły ciągu.

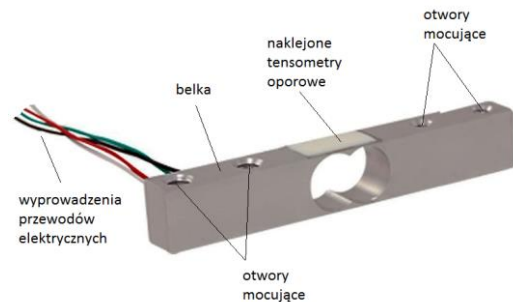
2. CZUJNIKI POMIAROWE

Pomiary poszczególnych parametrów będą realizowane przez odpowiednie czujniki do pomiaru danych wielkości. Przegląd czujników wraz z ich krótkim opisem będą stanowiły kolejne podrozdziały.

2.1. Pomiar siły ciągu i momentu obrotowego

Do pomiaru siły ciągu oraz momentu obrotowego zostanie zastosowany czujnik w postaci belki tensometrycznej. W przypadku pomiaru siły ciągu wystarczy zastosować jedną belkę prostopadłą do wektora siły ciągu, natomiast w przypadku momentu obrotowego konieczne jest zastosowanie dwóch belek ułożonych w jednej płaszczyźnie, do których silnik będzie przymocowany przegubowo poprzez specjalnie zaprojektowane łoża. Zastosowanie przegubów płaskich, w postaci zawiasów wyeliminuje negatywne działanie momentów skręcających belki, a tym samym wpłynie na dokładność wyników. Opisaną powyżej ideę prezentują rysunki 2 i 3.

Rdzeń belki tensometrycznej wykonany jest z metalu. Kształt zewnętrzny rdzenia oraz wydrążone w nim otwory zapewniają jednokierunkowy i jednorodny rozkład naprężeń oraz maksymalne odkształcenie. Ponadto wspomniane otwory wpływają pozytywnie na zwiększenie wytrzymałości belki na działanie momentów skręcających. Na rysunku 4 została przedstawiona budowa belki tensometrycznej.



Rys. 4. Budowa belki tensometrycznej

Budowa i zasada działania tensometrów oporowych

Podstawowym elementem wchodzącym w skład belki tensometrycznej jest tensometr rezystancyjny. Idea pomiarów tensometrycznych sprowadza się do pomiaru odkształceń na powierzchni danego ciała.

Tensometria rezystancyjna oparta jest na powszechnie znanej własności fizycznej przewodników, polegającej na zmianie rezystancji, wskutek zmiany przezeń długości.

Zasadę działania tensometru można opisać w następujący sposób. Czujnik umieszczony na badanej powierzchni, nie poddanej odkształceniu posiada opór elektryczny opisany wzorem (7):

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (7)$$

gdzie: ρ – opór właściwy

l – długość przewodnika

S – pole przekroju poprzecznego przewodnika

Jeżeli tensometr ulegnie odkształceniu wraz z elementem konstrukcji, które wzrosnie o Δl , to wzór (7) przyjmie postać:

$$\Delta R = \rho \frac{\Delta l}{S} \quad (8)$$

Powyższa zależność ma charakter uproszczony, gdyż przyrost długości wpływa na strukturę wewnętrzną materiału, stąd ρ musi ulec zmianie. Według uogólnionego prawa Hooke'a przekrój poprzeczny również ulegnie zmianie (wpływ współczynnika Poissona ν).

Logarytmując a następnie różniczkując związek (8) otrzymujemy:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S} \quad (9)$$

Dla skończonych przyrostów formuła (9) wynosi:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} \quad (10)$$

Dla przewodnika o przekroju kwadratowym i boku równym a mamy zależność:

$$\frac{\Delta S}{S} = 2 \frac{\Delta a}{a} \quad (11)$$

a po uwzględnieniu prawa Hooke'a:

$$\frac{\Delta S}{S} = -2\nu \frac{\Delta l}{l} \quad (12)$$

Stosując podstawienie na odkształcenie względne $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ otrzymujemy wzór na względny przyrost oporu:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} + \varepsilon + 2\nu\varepsilon \quad (13)$$

Podstawiając stałą k opisaną równaniem (14):

$$k = \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{1}{\varepsilon} + 1 + 2\nu \quad (14)$$

do równania (13) otrzymujemy podstawową zależność tensometrii oporowej w postaci:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (15)$$

gdzie: k - stała tensometru zależna od materiału, z którego jest wykonany

R - oporność elektryczna tensometru

ΔR - przyrost rezystancji tensometru wywołany odkształceniem próbki

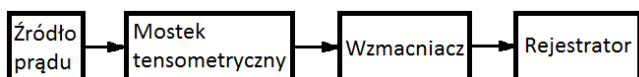
ε - odkształcenie względne czujnika

Z zależności (15) jasno wynika, że odkształcenie względne ε badanego obiektu jest wprost proporcjonalne do względnego przyrostu oporu $\Delta R/R$ naklejonego na nim tensometru. Jest to bezpośredni sposób powiązania ze sobą zjawisk zachodzących w badanej próbce i naklejonym na niej tensometrze.

Układy pomiarowe

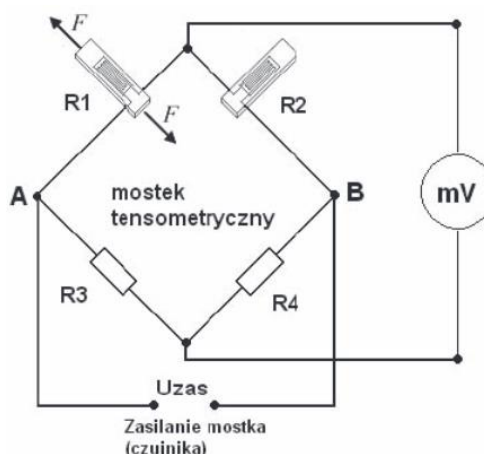
W pomiarach metodą tensometrii oporowej wykorzystuje się układy pomiarowe składające się z czterech podstawowych części (rys. 5):

- źródła prądu,
- mostka tensometrycznego wraz z tensometrem pomiarowym,
- wzmacniacza sygnału pomiarowego,
- urządzenia rejestrującego zmiany mierzonych wielkości.



Rys. 5. Kolejność elementów w torze przetwarzania

Zasada działania mostka tensometrycznego oparta jest na mostku Wheatstone'a (rys. 6).

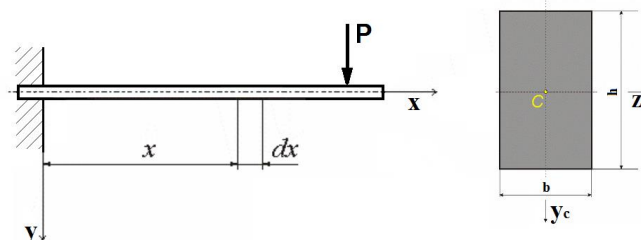


Rys. 6. Przykład mostka tensometrycznego

Elementami mostka mogą być wyłącznie tensometry (pełny mostek), dwa tensometry (półmostek) lub jeden tensometr (ćwierćmostek). Na rys. 6 tensometr o rezystancji R1 jest głównym elementem pomiarowym, zaś tensometr o oporności R2 jest tensometrem kompensacyjnym. W przypadku, gdy tensometry nie tworzą pełnego mostka, należy wówczas uzupełnić mostek rezystorami.

Pomiar momentu gnącego metodą tensometryczną

W rozważaniach przyjęto belkę (rys. 7) o przekroju $b \times h$ pracującą w stanie prostego zginania.



Rys. 7. Proste zginanie belki

Pojedynczy tensometr o osi pomiarowej równoległej do osi x belki, naklejony na powierzchni belki, przejmuje odkształcenie obciążonego ustroju. Znając odczyt napięcia z czujnika, a zatem i wartość odkształcenia ε , wyznaczmy moment gnący z zależności ujętych w teorii zginania:

$$\sigma_y = \frac{M_g(z)}{W_z} \quad (16)$$

gdzie: W_z - wskaźnik wytrzymałości na zginanie,
 σ_y - naprężenie normalne wzdłuż osi y ,
 $M_g(z)$ - moment gnący względem osi z .

Wskaźnik wytrzymałości na zginanie wyznaczamy ze wzoru

$$W_z = \frac{I_z}{y} \quad (17)$$

gdzie: I_z - moment bezwł. przekroju belki względem osi z ,
 y - współrzędna osi y .

Dla belki o przekroju prostokątnym, w której b oznacza szerokość belki, zaś h wysokość belki, moment bezwładności przekroju oraz wskaźnik wytrzymałości na zginanie wynoszą odpowiednio:

$$I_z = \frac{bh^3}{12} \quad (18)$$

$$W_z = \frac{bh^2}{6} \quad (19)$$

Przekształcając równanie (16) z uwzględnieniem równania (17) otrzymujemy następującą zależność na moment gnący:

$$M_g(z) = \sigma_y \frac{I_z}{y} \quad (20)$$

Przy założeniu, że belka będzie obciążana wyłącznie w zakresie stosowalności prawa Hooke'a, możemy skorzystać ze znanej zależności:

$$\sigma_y = E\varepsilon \quad (21)$$

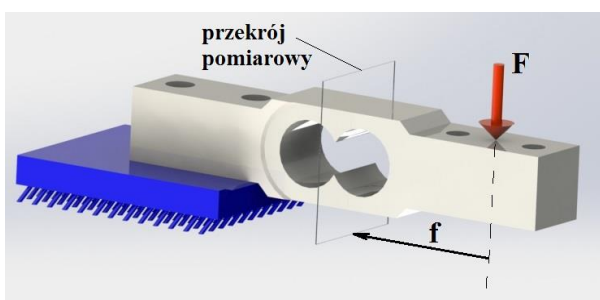
gdzie: E - moduł sprężystości Younga,
 ε - odkształcenie względne badanej belki.

Wówczas równanie (20) przybierze postać:

$$M_g(z) = E\varepsilon \frac{I_z}{y} \quad (22)$$

Wyznaczenie siły ciągu zespołu napędowego

W celu wyznaczenia siły ciągu zespołu napędowego posłużymy się następującym schematem (rys. 8):



Rys. 8. Schemat obciążenia belki tensometrycznej

Belka tensometryczna obciążona siłą ciągu F podlega zginaniu. Wówczas w przekroju pomiarowym odległym od wektora siły F o wartość f występuje moment gnący opisany poniższym równaniem:

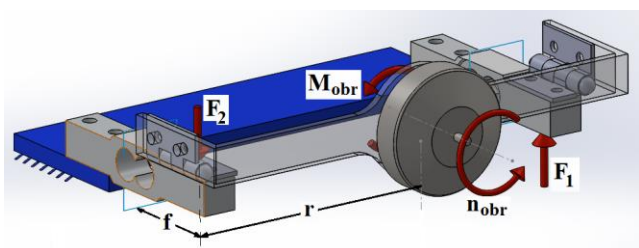
$$M_g(z) = Ff \quad (23)$$

Podstawiając równanie (23) do równania (22) oraz porządkując stronami uzyskujemy następujący wzór na siłę ciągu:

$$F = E\varepsilon \frac{I_z}{y \cdot f} \quad (24)$$

Wyznaczenie momentu obrotowego silnika

W celu wyznaczenia momentu obrotowego silnika posłużymy się następującym schematem (rys. 9):



Rys. 9. Stanowisko do pomiaru momentu obrotowego

Para belek tensometrycznych, położonych w jednej płaszczyźnie nie połączona jest przegubowo sztywnym łóżem silnika, w którego płaszczyźnie symetrii znajduje się oś silnika BLDC. Silnik wraz z łóżem jest sprzężony połączeniami śrubowymi. W trakcie pracy silnika na łóżu powstaje moment reakcyjny równy co do wartości momentowi obrotowemu silnika lecz przeciwnie skierowany. Wspomniany moment można z łatwością zamienić na parę sił F_1 i F_2 , o przeciwnych zwrotach działających na ramieniu r , które obciążają belki tensometryczne. W tym momencie, każdą z belek możemy analizować osobno, analogicznie jak w przypadku siły ciągu. Moment obrotowy wynika ze wzoru poniżej:

$$M_{obr} = (F_1 + F_2)r \quad (25)$$

Wprowadzając do równania (25) równanie (24) z odpowiednimi indeksami dolnymi otrzymamy równanie momentu obrotowego w funkcji odkształceń poszczególnych belek tensometrycznych:

$$M_{obr} = rE \frac{I_z}{y \cdot f} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (26)$$

2.2. Pomiar prędkości obrotowej

Pomiar prędkości obrotowej zespołu napędowego zostanie zrealizowany przy użyciu enkodera optycznego. Do jego najważniejszych zalet możemy zaliczyć odporność na pole magnetyczne silnika, szybkość działania oraz dokładność pomiarów. Enkoder optyczny składa się z diody nadawczej, odbiorczej (fotodiody) oraz tarczy posiadającej nacięte szczeliny. Wirująca na wale silnika tarcza będzie przecinać wiązkę światła wysyłaną przez diodę nadawczą w kierunku diody odbiorczej. W fotodiodzie będzie generowane napięcie impulsowe.

Enkoder posiada wyjście cyfrowe, z którego sygnał trafi dalej do procesora.

2.3. Pomiar napięcia

Napięcie będzie mierzone przed regulatorem prędkości ESC (ang. *electronic speed controller*), przy pomocy przetwornika analogowo-cyfrowego ADC (ang. *analog to digital converter*).

Przetworzony sygnał przejdzie przez procesor, który to z kolei zapisze informacje na karcie SD lub bezpośrednio na komputerze.

2.4. Pomiar natężenia prądu

Pomiar natężenia prądu pobieranego przez zespół napędowy zostanie wykonany przed regulatorem prędkości ESC, przy pomocy czujnika prądu. Następnie sygnał trafi do przetwornika analogowo-cyfrowego i dalej do procesora.

2.5. Współczynnik wypełnienia

Współczynnik wypełnienia jest wielkością której nie będziemy mierzyć, lecz zadawać do regulatora prędkości ESC. Dzięki temu będziemy mogli wpływać na prędkość obrotową silnika. Proporcjonalnie do współczynnika wypełnienia będzie zmieniać się prędkość.

2.6. Pomiar temperatury silnika

Pomiar temperatury silnika będzie się odbywał w oparciu o cyfrowy czujnik temperatury DS18B20 firmy Dallas, który komunikuje się przy użyciu interfejsu 1-wire. W celu zwiększenia dokładności wskazań, czujnik zostanie odizolowany od środowiska zewnętrznego specjalną termoizolacyjną obudową.

2.7. Pomiar wibracji

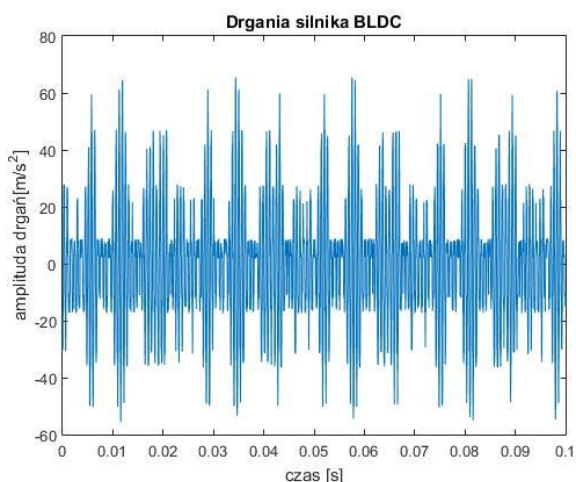
Pracujący w warunkach nominalnych silnik elektryczny generuje drgania mechaniczne o różnych częstotliwościach. Sygnały te w postaci wibracji od poszczególnych elementów silnika, w większości przypadków nie stanowią zagrożenia dla pracy całego układu. Niemniej jednak, w trakcie eksploatacji danego urządzenia

może dojść do uszkodzenia całego układu lub podzespołu. W dalszych naszych rozważaniach przyjmijmy, że jeden z elementów tocznych łożyska ulega uszkodzeniu i wówczas silnik zaczyna generować drgania o częstotliwości i amplitudzie nie występującej podczas normalnego trybu pracy.

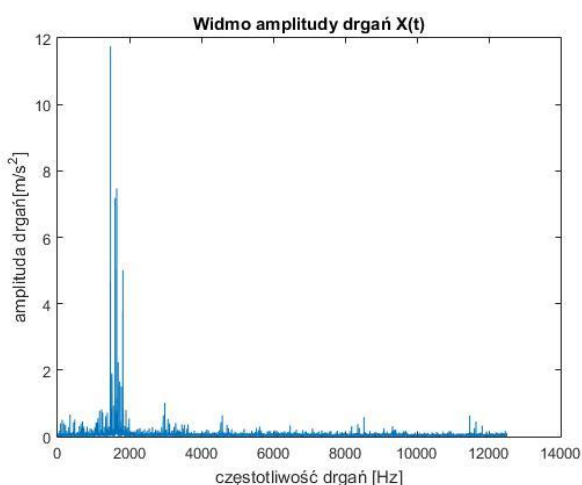
Analizę uszkodzeń silnika przeprowadzać będziemy w oparciu o szybką transformatę Fouriera FFT (ang. *Fast Fourier Transform*). Metoda ta zakłada, iż każdy sygnał okresowy można zaprezentować w postaci sumy sygnałów sinusoidalnych o różnych częstotliwościach i różnych amplitudach.

Pomiar wibracji będzie się odbywał poprzez zastosowanie układu do pomiaru przyspieszeń (trzyosiowy akcelerometr).

Sygnal zarejestrowany przez akcelerometr przedstawia rys. 10. Analizując rys.10 możemy zaobserwować, że sygnał nie jest czystą sinusoidą lecz składową wielu sinusoid. Zastosowanie Szybkiej Transformaty Fouriera pozwala na natychmiastową i dokładną ocenę składowych danego sygnału. Wynik prezentowany jest na wykresie gdzie oś Y oznacza amplitudę danej składowej zaś oś X wskazuje z jakimi częstotliwościami mamy do czynienia. Wynik FFT stanowi spektrum. Poddanie sygnału z rys. 10 Szybkiej Transformacji Fouriera skutkuje otrzymaniem spektrum jak na rys. 11.



Rys. 10. Zarejestrowany sygnał w dziedzinie czasu

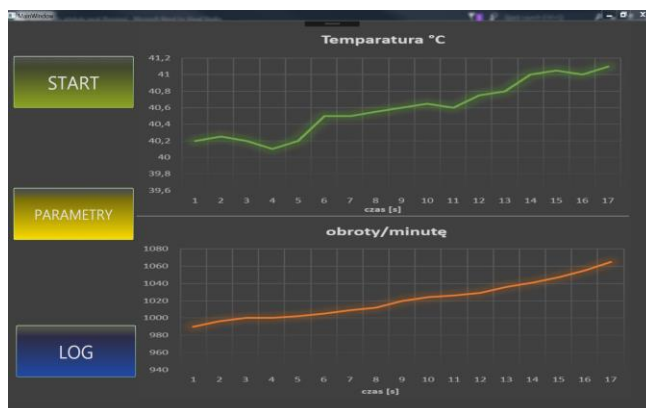


Rys. 11. Wynik zastosowania FFT

Jak widać, zastosowanie Szybkiej Transformaty Fouriera pozwala na błyskawiczną i precyzyjną weryfikację czy składowe sygnału wyjściowego należą do charakterystyki pracy sprawnego silnika czy niektóre z komponentów są oznaką pogorszenia się stanu technicznego silnika.

3. OPROGRAMOWANIE

Opisywany projekt koncepcyjny hamowni zakłada również opracowanie interfejsu w postaci aplikacji komputerowej umożliwiającej wygodną obsługę hamowni oraz akwizycję i zobrazowanie danych. Dane pomiarowe miałyby być prezentowane w postaci wygodnej do odczytania (np. wykresów) w czasie rzeczywistym na monitorze komputera PC. Ponadto istniałaby możliwość rejestracji mierzonych wielkości w postaci plików tekstowych, które w łatwy sposób mogą być poddane późniejszej analizie. Przykładowy wygląd interfejsu aplikacji przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 12. Propozycja interfejsu użytkownika oprogramowania

PODSUMOWANIE

W pracy omówiono projekt koncepcyjny zautomatyzowanej wielozadaniowej hamowni silników BLDC wchodzących w skład zespołu napędowego bezzałogowych statków powietrznych. W projekcie zostały podane metody pomiaru poszczególnych parametrów pracy zespołu napędowego, wraz z opisem czujników i zasadami ich działania. Projekt miał na celu stworzenie podstaw do wykonania rzeczywistego obiektu. Wykorzystanie hamowni pozwalałoby zredukować czas badań oraz koszty budowy bardziej skomplikowanych urządzeń.

BIBLIOGRAFIA

1. ep.com.pl/files/1703.pdf
2. www.fpvdrone.pl zdjęcie z budową silnika BLDC
3. <http://abc-modele.pl/konstrukcja-i-zasada-dzialania-silnika-bezszcotkowego/>
4. <http://forbot.pl/blog/artykuly/mechanika/silniki-elektryczne-szcotkowe-bezszcotkowe-krokowe-id2802>
5. <http://automatykaonline.pl/Artykuly/Technika-napedowa/napedy-blcd-w-zastosowaniach-przemyslowych>
6. <https://vibrationanalysis.wordpress.com/2011/03/28/do-czego-sluzy-fft/>
7. Kopkowicz M., Wytrzymałość materiałów – Laboratorium, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2007

Project of fully automated multi-purpose BLDC motor test stand

Paper discussed the conceptual project of BLDC motor test stand being a part of UAV power unit.

The aim of the project is to make a station for measuring power unit performance parameters. Following parameters will be analyzed: torque, thrust, motor temperature, motor rotational speed, voltage, electric current, motor efficiency, vibrations with and without propeller.

The analysis of above mentioned parameters allow us to: map out a detection and compensation method for motor defects, estimate motor life, create power unit database which enable us to design new UAVs in faster and more effective way.

Autorzy:

mgr inż. **Jarosław Ciszkowski** – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Zakład Samolotów i Śmigłowców; 01-494 Warszawa; ul. Księcia Bolesława 6; jaroslaw.ciszkowski@itwl.pl

mgr inż. **Sebastian Rutkowski** – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Zakład Samolotów i Śmigłowców; 01-494 Warszawa; ul. Księcia Bolesława 6; sebastian.rutkowski@itwl.pl

prof. nzw. dr hab. inż. **Mirosław Nowakowski** - Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Zakład Samolotów i Śmigłowców; 01-494 Warszawa; ul. Księcia Bolesława 6; miroslaw.nowakowski@itwl.pl

inż. **Karol Miłosek** – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Zakład Samolotów i Śmigłowców; 01-494 Warszawa; ul. Księcia Bolesława 6; karol.milosek@itwl.pl

mgr inż. pil. **Wojciech Lorenc** – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Zakład Samolotów i Śmigłowców; 01-494 Warszawa; ul. Księcia Bolesława 6; wojciech.lorenc@itwl.pl